

Ученому секретарю диссертационного совета Д217.014.01 при ФГУП  
«НАМИ» Р.Х. Курмаеву  
Россия, 125438, г. Москва,  
ул. Автомоторная, д. 2.

## О Т З Ы В

официального оппонента Годжаева Захида Адыгезаловича на  
диссертацию Тараторкина Александра Игоревича «Научные методы  
снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых  
передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств»,  
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по  
специальности 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины»

### 1. Актуальность темы исследования

Испытания опытных образцов перспективных машин свидетельствуют о высокой динамической нагруженности силовых передач, ограничивающей долговечность деталей, в частности, валов, шестерён, элементов управления - фрикционов, синхронизаторов, зубчатых муфт и деталей, сопрягаемых с ними. По этой причине разработчики предлагают новые все более сложные конструкции энергосиловых блоков, в состав которых могут быть включены вальные, планетарные и вально-планетарные редукторы, многодисковые сцепления, гидродинамические и гидрообъёмные передачи, электромашины, мотор-генераторы, электронные и электрогидравлические блоки управления и др. Разработка перечисленных выше устройств в условиях жёстких ограничений по массе, габаритам, эргономическим и вибраакустическим показателям при обеспечении требуемого уровня динамической нагруженности, а также для отдельных видов перспективных машин уровня комфорtabельности, требует разработки новых подходов к исследованию динамики этих систем и их проектирования с использованием современных математических методов и программно-аппаратного обеспечения. Кроме того, нагруженность, в значительной степени, определяется малоизученными динамическими эффектами – в частности возбуждением параметрических резонансов, проявлением эффектов термоупругой неустойчивости в элементах переключения передач, возбуждающим действием электронных систем управления двигателя и трансмиссии при некорректной настройке алгоритмов, эффектом «Бонанса», нелинейностью и переменностью структуры исследуемых систем. Существующие методики проектирования

энергосиловых установок не в полной мере учитывают данные эффекты.

В настоящее время в распоряжении исследователей, инженеров появились инновационные программно-аппаратные средства, позволяющие реализовать сложнейший математический аппарат для решения задач ограничения динамической и вибраакустической нагруженности на совершенно новом научно-техническом уровне. Современные CAE, CAD программные пакеты в совокупности с уникальным исследовательским оборудованием, позволяют разрабатывать различной степени сложности модели, в частности, силовых передач, на новом, не достижимом ранее уровне – твердотельные мультидисциплинарные модели, конечно-элементные, конечно-разностные и др., описывающие с высокой степенью адекватности механические, газогидродинамические, тепловые процессы различных сложных систем, в том числе и мехатронных. **В связи с этим решение проблемы снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на новом этапе научно-технического развития в области математических и инженерных наук, несомненно является важной задачей.** А диссертация Тараторкина А.И., направленная на разработку научных методов снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств с учётом перечисленных выше и неисследованных ранее нелинейных эффектов является **актуальной**.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Автором на защиту выносятся основные результаты и выводы, а также положения научной новизны и практической значимости диссертационного исследования.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается:

– в разработке нового расчётно-экспериментального метода решения научной проблемы снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин, отличающегося применением алгоритмов структурно-динамического анализа для научно-обоснованной вариации модальных свойств сложных механических систем с использованием современных программных и вычислительных средств CAD-CAE;

– в разработке новых моделей исследуемых мехатронных систем, учитывающих переменность структуры и нелинейность упруго-демпфирующих свойств силовых передач на установившихся и переходных режимах работы с учётом «конфликтов задач», возникающих при совместной реализации алгоритмов управления структурными составляющими силовых

передач мобильных машин;

– в установлении новых закономерностей формирования динамической нагруженности в элементах управления (фрикционных дисках) силовой передачи, отличающихся учётом малоизученных эффектов возбуждения параметрических резонансов и термоупругой неустойчивости (патент РФ на изобретение № 2728584), а также вариацией объёма рабочей жидкости в компенсационной камере бустера управления коробок передач;

– в разработке метода перераспределения силового противофазного управляющего воздействия (при возбуждении низкочастотных энергоёмких колебаний на собственной частоте системы при управлении переключением передач после окончания фазы выравнивания скоростей ведущих и ведомых элементов – эффект «Бонанца»), отличающегося учётом и идентификацией начальной фазы колебаний, определяемой по значениям сигнатур первой и второй производных крутящего момента (патент РФ на изобретение № 2735455);

– в обосновании алгоритмов стабилизации колебательных процессов в силовых передачах колёсных и гусеничных машин, отличающихся определением места установки и параметров гасителя крутильных колебаний с учётом возникновения суб- и супергармонических возмущений, а также возможности возникновения «конфликта задач» при реализации алгоритмов управления тепловым двигателем, электромашиной и трансмиссией;

– в разработке новых математических моделей и в обосновании технических решений по снижению динамической нагруженности силовой передачи привода водомётных движителей амфибийных машин, усовершенствованной методики проектного расчёта системы «двигатель – трансмиссия – водомётный двигатель – машина», отличающихся учётом кинематических, силовых, периодически изменяемых свойств системы, возбуждающих резонансные параметрические колебания, а также учётом нелинейных характеристик соединений опор углового редуктора силовой передачи;

– в результатах экспериментальной и количественной оценки новых малоизученных явлений возникновения высокомоментного и высокочастотного полигармонического возбуждения, формируемого нелинейными свойствами гидравлических и механических систем (кавитационными процессами в полостях масляных насосов и боковыми зазорами в зубчатых зацеплениях редукторов и др.).

Необходимо отметить, что новизна технических решений подтверждена большим количеством патентов РФ на изобретения и полезные модели.

**Практическая значимость диссертационного исследования**  
заключается:

в повышении достоверности прогнозирования динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на ранних стадиях проектирования. Разработанные автором метод верификации модальных моделей для прогнозирования и оптимизации динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач энергосиловых блоков колесных и гусеничных машин; метод силового перераспределения управляющих воздействий с учетом идентификации начальных условий; метод определения приведенных моментов инерции с учетом присоединенных масс жидкости в механогидравлических системах; метод точного экспериментального определения модальных параметров фрикционных дисков и др. позволяют на высоком научно-техническом уровне решать задачи снижения динамической и вибраакустической нагруженности энергосиловых блоков колесных и гусеничных машин, различных силовых передач. Подтверждением этого являются акты внедрения головных разработчиков трансмиссий перспективных машин в рамках федеральных программ РФ.

**Достоверность и обоснованность** результатов работы подтверждается:

- результатами экспериментальных исследований, актами о внедрении, в том числе ИМАШ УрО РАН, АО «СКБМ», ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», ООО «Миконт», ООО «КАТЕ», ФГБОУ Курганский государственный университет.

- корректностью формулировки цели, постановки задач исследования, применяемых методов нелинейной теории колебаний, изложенных в фундаментальных трудах отечественных и зарубежных учёных, методов динамического анализа сложных механических и мехатронных систем, численных методов решения систем дифференциальных уравнений, методов конечных элементов и конечных разностей, методов модального анализа динамических систем, экспериментальных методов исследования динамической и вибраакустической нагруженности транспортных средств. При решении поставленных задач эффективно используются результаты имитационного моделирования на ЭВМ и экспериментальных исследований.

Таким образом, по результатам анализа научных положений, выносимых автором диссертационного исследования на защиту, можно сделать заключение, что они обладают научной новизной, а выводы и рекомендации являются обоснованными.

**3. Теоретическая и практическая ценность исследования**

Диссертационная работа отличается высоким уровнем теоретических разработок и большим объемом экспериментальных исследований,

совокупный результат которых расширяет научное знание в области расчета и проектирования силовых передач колесных и гусеничных машин.

**Теоретическая ценность** диссертационной работы состоит в развитии теории создания колёсных и гусеничных машин в части, касающейся обоснования и разработки методов снижения и обеспечения требуемого уровня динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на основе модального представления исследуемых систем и совершенствования их модальных свойств.

**Практическая ценность** диссертационной работы заключается в успешной реализации результатов работы при проектировании силовых передач новых и модернизируемых колесных и гусеничных машин, в создании которых автор принимал непосредственное участие.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований отражены в двух отчётах по ОКР, переданных в АО «СКБМ», г. Курган, четырёх отчётах по НИОКР, переданных ООО «Миконт», г. Чебоксары, трёх отчётах, переданных ФГУП «НАМИ», г. Москва, и отчётах о НИОКР, подготовленных по результатам выполнения государственных контрактов № 7826р/11397 от 15.04.2010, № 9874р/11397 от 11.01.2012, № 12438р/11397 от 09.01.2014 с федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере»; при выполнении проектов № 2714, № ААА-А18-118020290032-8 (номер госрегистрации в ЕГИСУ НИОКР № 01201461775), при выполнении НИР по гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных МК-5809.2018.8 «Научное обоснование и разработка метода гашения колебаний при переходных процессах в трансмиссиях перспективных транспортных машин на основе модального представления объекта управления». Результаты диссертационной работы также использованы в учебном процессе при подготовке студентов специальности 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения», аспирантов специальности 05.05.03 «Колёсные и гусеничные машины» в Курганском государственном университете, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Материалы диссертации могут быть использованы в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, занимающихся проектированием колесных и гусеничных машин, а также в учебном процессе высших учебных заведениях технического профиля.

#### **4. Оценка содержания и завершённости диссертации и автореферата**

Диссертационная работа Тараторкина А.И. состоит из введения, пяти

глав, основных результатов работы и выводов по работе (заключение), списка литературы из 137 наименований. Работа содержит 371 страницу машинописного текста, включая 195 рисунков, 43 таблицы. В приложении приведены акты внедрения. Сискателем сформулированы выводы после каждой из пяти глав, в заключении перечислены результаты всей работы.

**Во введении** обосновывается актуальность работы, поставлена цель и задачи исследования, излагается предложенный подход решения проблемы, сформулированы научная новизна и практическая ценность результатов, приведены выносимые на защиту положения.

**В первой главе** (Состояние вопроса, обоснование задач исследования и предлагаемые подходы их решения) проведён анализ состояния проблемы, выполненный на основе обзора отечественных и зарубежных литературных источников, в которых приводятся результаты исследований, направленных на разработку методов прогнозирования, снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин. Обоснована целесообразность единого подхода к решению данной проблемы на основе модального представления систем и совершенствования их модальных свойств в широком диапазоне частот с учетом проявления малоисследованных нелинейных эффектов. Выполненные в первой главе исследования позволили сформулировать задачи, направленные на достижение цели работы, решению которых посвящены остальные главы диссертации.

**Во второй главе** (Теоретическое обоснование путей снижения динамической и вибраакустической нагруженности трансмиссий на установившихся и переходных режимах) изложены теоретические основы разрабатываемого метода прогнозирования динамической и вибраакустической нагруженности при модальном представления динамических систем, позволяющем при выполнении модального анализа наиболее полно реализовать технологию исследования и оценки значимости отдельных параметров, описывающих ее динамическое поведение. Основная идея такого подхода заключается в определении модальных параметров (собственных частот и форм колебаний, коэффициентов демпфирования и др.) на основе знания частотных характеристик, вычисляемых либо на основе расчёта с использованием матриц распределения масс, жёсткости и демпфирования, либо по результатам определения частотных характеристик по отношению между параметрами реакции и входного воздействия как функции частоты при экспериментальном исследовании. Изложенная последовательность действий как при аналитическом, так и при экспериментальном подходах, а также при их совокупности позволяет

определить модальные характеристики динамической системы, в том числе вклад отдельных форм колебаний при известном возмущении. Приводятся примеры формализации нелинейных свойств при описании возмущений, формируемых, в частности, зубчатыми зацеплениями и др., выполняется оценка устойчивости исследуемых процессов при решении задач прогнозирования динамической нагруженности.

**В третьей главе** (Совершенствование параметров динамической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин) автор приводит конкретные примеры применения предлагаемого метода снижения динамической нагруженности при низкочастотных колебаниях различных трансмиссионных систем модернизируемых и разрабатываемых наземных и амфибийных машин на установившихся и переходных режимах работы. Метод применён при исследовании динамической нагруженности силовых передач легкового автомобиля категории М1, грузовых автомобилей категорий Н2, Н3 и перспективных быстроходных гусеничных машин. Приводятся научные обоснования необходимых изменений в модальных свойствах трансмиссий этих транспортных средств, эффективность которых подтверждается соответствующими экспериментальными работами. В данной главе приводятся результаты исследований мехатронных трансмиссионных систем с учетом эффекта «конфликта задач», возникающего при совместной реализации алгоритмов управления структурными составляющими энергосиловых блоков колёсных и гусеничных машин на установившихся и переходных режимах работы. При расчёте крутильных колебаний в гидромеханической трансмиссии, прогнозировании динамической нагруженности, вероятности возникновения резонансных режимов в силовых элементах трансмиссии выполнен модальный анализ моторно-трансмиссионной установки перспективной быстроходной гусеничной машины. Приводятся модели, устанавливаются и анализируются новые закономерности формирования динамической нагруженности фрикционных дисков трансмиссий, отличающихся учётом малоизученных эффектов возбуждения параметрических резонансов и термоупругой неустойчивости, а также учетом вариации объёма рабочей жидкости в компенсационной камере бустера управления. Разрабатывается и подробно излагается метод перераспределения силового противофазного управляющего воздействия при возбуждении низкочастотных энергоёмких колебаний на собственной частоте системы при управлении переключением передач после окончания фазы выравнивания скоростей, ведущих и ведомых элементов. Приводятся результаты расчетно-экспериментального исследования и обоснованные технические решения по снижению динамической нагруженности силовой

передачи привода водомётных движителей амфибийной машины при возбуждении резонансных параметрических колебаний. Кроме того, в разделе приводятся результаты выполнения анализа источников возмущений, являющихся причиной возникновения резонансных процессов в силовых передач. Выполнен гармонический анализ по определению неравномерности момента различных двигателей (L4, V6, V8, V10, V12 мощностью до 660 л.с.), формируемого газовыми и инерционными силами, а также проведена оценка влияния на динамическую нагруженность трансмиссий периодических составляющих момента, формируемого электромашиной.

**В четвертой главе** (Прогнозирование и снижение параметров вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин) описываются и излагаются результаты реализации разработанного научного метода снижения вибраакустической нагруженности силовых передач транспортных машин на основе структурно-динамического анализа сложных механических систем и совершенствования их модальных свойств. Основное внимание уделяется результатам выполнения структурного анализа и расчёту акустического излучения на примере разрабатываемых опытных образцов АКП с роботизированным сцеплением и АКП с двойным сцеплением для автомобилей категории N2 и N3. Существенным дополнением к существующим методам определения вибраакустической нагруженности является учёт возмущений, проявляющихся в следствие нелинейности исследуемых систем. Прорабатываются инженерные решения по изменению структурного состояния конструкции АКП для обеспечения приемлемого уровня акустического излучения. Приводятся результаты экспериментальной оценки эффективности предлагаемых решений.

**В пятой главе** (Программно-аппаратное обеспечение экспериментальных исследований динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин) автор сформулировал цели и задачи при проведении экспериментальных исследований динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач транспортных машин для реализации метода модального представления, обосновывал перечень необходимого испытательного оборудования, информационно-измерительного и программного обеспечения для проведения ходовых и стеновых испытаний. Обосновываются требования к постановке экспериментов при проведении низкочастотных и высокочастотных испытаний для определения динамической нагруженности силовых передач различных транспортных. Для измерения отдельных параметров, характеризующих модальные, функциональные и другие характеристики силовых передач, созданы и описаны специальные устройства

и разработаны оригинальные способы их определения. Приводится последовательность и алгоритмы экспериментального определения параметров исследуемых динамических систем, исследуемых динамических и виброакустических процессов. Описываются результаты экспериментальных исследований при определении динамической нагруженности, результаты оценки модальных параметров, подтверждающих адекватность разработанных моделей.

Таким образом, изложенные автором в диссертации материалы, результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о его высокой научной эрудции, умении использовать в исследованиях основные положения многих общенаучных и технических дисциплин. Автор провел в большом объеме расчеты, участвовал в проведении трудоемких экспериментов, результаты которых подтверждают сделанные теоретические выводы и обобщения.

## **6. Основные замечания по содержанию диссертации:**

К замечаниям по диссертационной работе следует отнести следующее:

1. Результатом расчётных работ по оценке и прогнозированию динамической нагруженности силовых передач могла бы быть оценка возможности повышения ресурса конструкции. Ведь, как известно, основной эффект от снижения динамической нагруженности и вибративности конструкции является повышение ресурса или сопротивление усталости. Но, в диссертации не приведена расчётная оценка этих показателей.

2. Для снижения динамической и виброакустической нагруженности автор применяет метод вариации модальных свойств объекта, хотя фактически предлагается изменять упруго-демпфирующие и массо-инерционные параметры системы. Не ясно почему используется для снижения динамической нагруженности промежуточный параметр – модальные свойства колебательной системы, а не первичные – массо-инерционные и упруго-демпфирующие, это было бы более корректно и эффективно для достижения поставленной цели.

3. При составлении математических моделей силовых передач автор выполняет разделение элементов конструкции на сосредоточенные массы, связанные между собой упругими соединениями. Ничего не говорится о допущениях, которых необходимо придерживаться при детализации сосредоточенной колебательной системы, в частности, при оценке нагруженности самих коробок передач.

4. Представляется целесообразным определить перечень возмущающих воздействий на динамическую систему силовой передачи, формируемые различными источниками генерации этих возмущений в полнокомплектной

машине в условиях эксплуатации, в том числе причины возникновения и весомость этих возмущений. Эта перечень могла бы эффективно использоваться на стадии проектирования для синтеза оптимальных характеристик силовой передачи.

Указанные выше замечания не изменяют общей положительной оценки диссертации. Все сказанное даёт право считать диссертацию Тараторкина А.И. завершённым исследованием, которое даёт учёному и разработчику научно-методический аппарат, позволяющий эффективно решать научные и инженерные задачи, возникающие в процессе разработки трансмиссий колёсных и гусеничных машин.

## **7. Публикации и соответствие содержания диссертации и автореферата**

Основные положения диссертации изложены в достаточном числе публикаций, автореферат в основном соответствует её содержанию.

Публикации, приведённые в автореферате, включают материалы по основным разделам диссертации. Основные положения и результаты исследований изложены в 76 публикациях, в том числе 13 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание учёной степени доктора наук, в изданиях, входящих в международные системы цитирования SCOPUS и Web of Science – 23, 1 монография. По результатам работы получено 19 патентов РФ на изобретения и полезные модели.

Значительная часть диссертации выполнена в рамках многих государственных контрактов грантах, в том числе при выполнении НИР по гранту Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных МК-5809.2018.8 «Научное обоснование и разработка метода гашения колебаний при переходных процессах в трансмиссиях перспективных транспортных машин на основе модального представления объекта управления».

Результаты работы прошли апробацию на многих международных и отечественных научно-технических мероприятиях, в том числе на конгрессах FISITA (Пекин-2012, Китай; Маастрихт-2014, Голландия; Ченнаи-2018, Индия); на ежегодных научных конференциях, проводимых ОИМ НАН Беларусь совместно с БГТУ; в международной школе молодых учёных «Нелинейная динамика машин» (School-NDM), проводимой ИМАШ РАН; на XVII Симпозиуме «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» (DYVIS-2012) (Москва – Клин) в 2012 году; на международном конгрессе «International Congress of Heavy Vehicles, Road Trains and Urban Transport» в 2010 году, «European Automotive Congress» (Республика Беларусь) в 2019 году;

на XXV, XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов в ИМАШ РАН (МИКМУС) (Москва) в 2013, 2014 гг.; на научно-технической конференции «Броня-2013» (Омск); на Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (Санкт-Петербург) в 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2021 гг.; на VI, VII International BAPT Conference «Power Transmissions 2019–2020 гг.» (Болгария), IC-MTMTE 2018–2021 (г. Севастополь); на 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC-2018), Португалия.

Диссертационная работа выполнена на высоком методическом и научном уровне, содержит всесторонний анализ обозначенных в ней актуальных проблем. Диссертант владеет современными методами динамического анализа сложных механических и мехатронных систем, численными методами решения систем дифференциальных уравнений, методами математической статистики, методом конечных элементов и конечных разностей, методами теории транспортных машин, методом модального анализа динамических систем, экспериментальными методами исследования динамической и вибраакустической нагруженности транспортных средств и элементов виброзащитных систем.

## **8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о порядке присуждения учёных степеней**

Диссертация Тараторкина Александра Игоревича на соискание ученої степени доктора технических наук «Научные методы снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств» выполнена на актуальную тему и является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей паспорту научной специальности 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины».

Сформулированные в диссертационной работе цель и задачи актуальны для отечественной промышленности. Основные научные положения, выносимые на защиту, нашли отражение в выводах диссертационного исследования. Полученные результаты свидетельствуют о решении поставленных задач и достижении цели диссертационного исследования.

Диссидентом решена крупная научно-практическая проблема, имеющая важное социально-экономическое хозяйственное значение для национальной экономики, а именно решение важной научной проблемы снижения и обеспечения необходимого уровня динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин на основе совершенствования модальных свойств, обоснование и

разработка комплекса научных методов снижения динамической и вибраакустической нагруженности силовых передач колёсных и гусеничных машин путём вариации модальных свойств.

В целом по актуальности, научной новизне, объёму материалов, научной ценности теоретических и экспериментальных исследований, а также практическому значению полученных результатов, выполненная работа Тараторкина Александра Игоревича соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а сам соискатель заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.05.03 - «Колесные и гусеничные машины».

Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор, член-  
корреспондент РАН, заместитель директора  
по инновационной и внедренческой  
деятельности ФГБНУ «Федеральный  
научный агроинженерный центр ВИМ»

  
30/4 —  
04.05.2022.

З.А. Годжаев

Подпись Годжаева З.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБНУ «Федеральный  
научный агроинженерный центр ВИМ»

А.В. Соколов



ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 109428, г. Москва,  
1-й Институтский проезд, дом 5, fic51@mail.ru